

学校编码: 10384

学号: 200436004

分类号: \_\_\_\_\_ 密级: \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

### 外磁场对铁基合金中相变热力学及动力学的影响

Effect of the external magnetic field on the phase transition  
thermodynamics and kinetics of Fe-based alloys

方 宇 明

指导教师姓名: 刘兴军 教授

专 业 名 称: 材料物理与化学

论文提交日期: 2007 年 7 月

论文答辩时间: 2007 年 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2007 年 7 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在          年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期：      年    月    日

导师签名：

日期：      年    月    日

## 摘要

外磁场下铁基合金的相变热力学及相变动力学已成为材料学的研究热点之一。大量的研究表明,在外磁场的作用下,铁基合金的微观组织会发生变化,通过控制外磁场强度及热处理温度,可以达到改善合金机械性能的目的。

到目前为止,外磁场下铁基合金的相变热力学及相变动力学的研究还很有限。本论文对外磁场下纯铁及铁基合金的磁学性能、相变热力学和相变动力学进行了理论计算,其主要研究结果如下:

(1) 采用分子场理论对不同外磁场下纯铁及铁基合金的磁化强度进行了计算,并定义磁化强度-温度曲线的拐点为居里温度,从而计算了外磁场下的居里温度。结果表明磁化强度及居里温度随外磁场强度的增加而提高。

(2) 考虑了外磁场对  $\alpha$  相 Gibbs 自由能的影响,并计算了纯 Fe, Fe-C, Fe-Si, Fe-Mo, Fe-Cr 和 Fe-Mo-Si 各体系中的  $\alpha/\gamma$  相平衡,结果表明  $\alpha$  相随外磁场强度的增加越来越稳定,其相区越来越大。

(3) 根据无外磁场时的扩散系数计算模型,首次推导了外磁场下的扩散系数计算模型,并利用外磁场下的扩散系数计算模型对  $\alpha$ -Fe 自扩散系数及 Ni 和 Co 在  $\alpha$ -Fe 中的扩散系数进行了计算。计算结果表明扩散系数随温度的降低而减小,随外磁场强度的增加而减小,而且在居里点附近减小得较显著,  $\lg D$ - $T$  曲线也变得圆滑。

(4) 利用经典形核理论及晶体生长模型,并考虑外磁场对相变驱动力的影响,计算了外磁场下纯铁及 Fe-1C (at. %) 合金中  $\gamma \rightarrow \alpha$  相变的形核势垒、临界形核半径、形核率、晶体生长速度和 TTT 曲线。结果表明外磁场下形核势垒和临界形核半径减小,形核率与生长速度都增大,且形核率比生长速度增大得更明显,TTT 曲线的鼻温升高,相转变时间缩短。因此本研究的计算结果很好地符合晶粒细化的必要条件,从而解释了外磁场下  $\alpha$  相晶粒能够得到细化的原因。

本论文的研究结果为外磁场下纯铁及铁基合金的居里温度、相平衡和相变动力学的实验研究提供了重要的理论指导。

**关键词:** 外磁场; 相变; 扩散系数

**Abstract**

Under the external magnetic field, the thermodynamics and kinetics of phase transition of Fe-based alloys have become a hot topic in the field of materials science. The previous research indicates that the microstructure of Fe-based alloys will change in the external magnetic field. Consequently, the mechanical properties of Fe-based alloys can be improved by controlling the strength of external magnetic field and the temperature of heat treatment.

So far, the thermodynamics and kinetics of phase transition of Fe-based alloys in external magnetic field were rarely studied. In this work, under the external magnetic field, the magnetic properties, the thermodynamics and kinetics of phase transition in pure iron and Fe-based alloys were calculated. The results are listed as following:

(1) Based on the Weiss molecular field theory, the magnetization of pure iron and Fe-based alloys were calculated under various external magnetic fields. The Curie temperature was defined as the inflexion of the  $M$ - $T$  curve, then the Curie temperature in the external magnetic field can be obtained. The results indicate that both the magnetization and Curie temperature increase with increasing external magnetic field.

(2) Considering the influence of external magnetic field on the Gibbs free energy of  $\alpha$  phase, the  $\alpha/\gamma$  phase equilibrium of pure iron, Fe-C, Fe-Si, Fe-Mo, Fe-Cr and Fe-Mo-Si systems were calculated, respectively. The results indicate that the  $\alpha$  phase become more stable in external magnetic field.

(3) Based on the diffusion coefficient model without external magnetic field, the diffusion coefficient model with external magnetic field was firstly deduced. Then the  $\alpha$ -Fe self-diffusion coefficient and the diffusion coefficient of Ni and Co in  $\alpha$ -Fe were calculated by the deduced model. The calculated results indicate that the diffusion coefficient decreases with the decreasing of temperature and the increasing of external magnetic field intensity, and near the Curie temperature, the diffusion coefficient decreases obviously and the  $\lg D$ - $T$  curve becomes smoothly.

(4) Based on the classical nucleation theory and grain growth model, and considering the influence of external magnetic field on the  $\gamma \rightarrow \alpha$  phase transition driving force, the critical nucleation energy, critical nucleation radius, nucleation ratio, grain growth velocity and TTT kinetics curves of  $\gamma \rightarrow \alpha$  phase transition in pure iron and Fe-1C (at. %) alloy were calculated. The results indicate that under the external

magnetic field, the nucleation potential energy and critical nucleation radius decrease; the nucleation ratio and growth velocity increase, and the nucleation ratio changes more obviously; the nose of the TTT curves increases and the time of phase transition shortens. These results are good fit with the condition of grain refinement, so they can explain the reason of grain refinement in external magnetic field.

The calculated results can provide a guidance for the experiments of the Curie temperature, phase equilibrium and phase transition kinetics of pure iron and Fe-1C (at. %) alloy.

**Keywords:** External magnetic field; Phase transitions; Diffusion coefficient

## 目 录

第一章 绪 论	1
1.1 概述	1
1.2 外磁场在材料制备过程中的应用	1
1.2.1 外磁场在材料热处理过程中的应用	1
1.2.2 外磁场下烧结对材料性能的影响	2
1.2.3 外磁场对金属凝固组织的影响	3
1.3 外磁场对固态相变的影响	5
1.3.1 外磁场下的马氏体转变	5
1.3.1.1 外磁场对马氏体转变点 ( $M_s$ ) 及其转变动力学的影响	5
1.3.1.2 外磁场诱发马氏体转变的转变量及形貌变化	9
1.3.2 外磁场下的铁素体转变	10
1.3.2.1 外磁场对奥氏体-铁素体相平衡的影响	10
1.3.2.2 外磁场对铁素体转变动力学及微观形貌的影响	13
1.4 外磁场对原子扩散的影响	15
1.5 外磁场处理技术的展望与未来急需解决的问题	16
1.6 本研究工作的内容, 目的及意义	17
第二章 外磁场对纯铁和铁基合金的磁化强度及居里温度的影响	18
2.1 分子场理论	18
2.2 结果与讨论	20
2.2.1 纯铁及铁基合金的磁化强度随外磁场强度的变化	20
2.2.2 纯铁及铁基合金的居里温度与外磁场的关系	21
2.3 小结	24
第三章 外磁场下纯铁及铁基合金的 $\alpha$ (bcc)/ $\gamma$ (fcc) 相平衡	25
3.1 相图热力学计算原理及模型	25
3.1.1 相图热力学计算原理	25
3.1.2 热力学模型	26

3.1.3 磁自由能模型.....	28
3.1.4 外磁场下的相平衡计算.....	29
<b>3.2 结果与讨论 .....</b>	<b>31</b>
3.2.1 外磁场对纯铁 $\alpha$ 相的 Gibbs 自由能的影响.....	31
3.2.2 外磁场对纯铁及铁基合金的 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	32
3.2.2.1 外磁场对纯铁中 $\alpha/\gamma$ 相变温度的影响.....	33
3.2.2.2 外磁场对 Fe-C 二元系中 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	35
3.2.2.3 外磁场对 Fe-Mo 二元系中 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	36
3.2.2.4 外磁场对 Fe-Si 二元系中 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	37
3.2.2.5 外磁场对 Fe-Cr 二元系中 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	38
3.2.2.6 外磁场对 Fe-Mo-Si 三元系中 $\alpha/\gamma$ 相平衡的影响.....	39
<b>3.3 小结.....</b>	<b>40</b>
<b>第四章 外磁场对磁性原子在 <math>\alpha</math>-Fe 中扩散系数的影响 .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 固态扩散 .....</b>	<b>41</b>
4.1.1 固态扩散的分类及扩散条件.....	41
4.1.2 扩散基本定律.....	41
4.1.3 扩散机制.....	42
4.1.4 影响扩散的因素.....	45
<b>4.2 外磁场下磁性原子在 <math>\alpha</math>-Fe 中的扩散系数计算模型 .....</b>	<b>46</b>
4.2.2 无外磁场时的扩散系数计算模型.....	46
4.2.2.1 磁性对扩散激活能的贡献.....	46
4.2.2.2 扩散系数计算模型.....	47
4.2.3 外磁场下扩散系数计算模型的提出.....	48
<b>4.3 结果与讨论 .....</b>	<b>49</b>
4.3.1 外磁场对纯铁自扩散系数的影响.....	49
4.3.2 外磁场对 Co 和 Ni 在 $\alpha$ -Fe 中扩散系数的影响 .....	49
<b>4.4 小结.....</b>	<b>51</b>
<b>第五章 外磁场对纯铁及 Fe-1C (at. %) 合金中 <math>\alpha/\gamma</math> 相变动力学的影响 .....</b>	<b>52</b>



5.1 磁场下相变动力学的计算模型 .....	52
5.1.1 无磁场时相变动力学的计算模型 .....	52
5.1.2 外磁场下纯铁及铁碳合金中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变形核率及纯铁 $\alpha$ 相生长速度的计算 .....	55
5.2 结果与讨论 .....	56
5.2.1 外磁场对纯铁及 Fe-1C (at. %) 合金中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的临界形核半径和形核势垒的影响 .....	56
5.2.2 外磁场对纯铁及 Fe-1C (at. %) 合金中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的形核率的影响 .....	59
5.2.3 外磁场对纯铁中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的晶体生长速度的影响 .....	60
5.2.4 外磁场对纯铁及 Fe-1C (at. %) 合金中 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的 TTT 曲线的影响 .....	61
5.3 小结 .....	62
结 论 .....	64
参考文献 .....	65
附 录 .....	71
硕士期间发表的学位论文 .....	74
致 谢 .....	75

## Contents

<b>1 Reviews.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Application of external magnetic field in the preparation of metallic materials.....</b>	<b>1</b>
1.2.1 Application of external magnetic field in the thermomechanical process of materials.....	1
1.2.2 Application of external magnetic field sintering in the preparation of materials.....	2
1.2.3 The influence of external magnetic field on metal solidification microstructure .....	3
<b>1.3 Effect of external magnetic field on the solid phase transformation.....</b>	<b>5</b>
1.3.1 The transformation of martensite in the external magnetic field.....	5
1.3.1.1 The influence of external magnetic field on $M_s$ and kinetics of martensite.....	5
1.3.1.2 The changes of transition quantity and microstructure of external magnetic field-induced martensite.....	9
1.3.2 The transformation of ferrite in the external magnetic field.....	10
1.3.2.1 The influence of external magnetic field on the austenite-ferrite phase equilibrium.....	10
1.3.2.2 The influence of external magnetic field on the transition kinetics and microstructure of ferrite .....	13
<b>1.4 Effect of external magnetic field on the diffusion of atoms.....</b>	<b>15</b>
<b>1.5 Perspectives of the Magneto-Thermo-Mechanical technique .....</b>	<b>16</b>
<b>1.6 Contents, Purpose and Sense of this work.....</b>	<b>17</b>
<b>2 Effects of external magnetic field on the magnetization and Curie temperature .....</b>	<b>18</b>

<b>2.1 Molecular field theory .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Results and Discussion.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Magnetization changes with the external magnetic field intensity .....	20
2.2.2 Relationship of the Curie temperature and external magnetic field .....	21
<b>2.3 Summary.....</b>	<b>24</b>
<b>3 The <math>\alpha/\gamma</math> Phase equilibrium in the external magnetic field .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Thermodynamic theory and model of the calculation of phase diagrams .....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Thermodynamic theory .....	25
3.1.2 Thermodynamic model .....	26
3.1.3 Model of the magnetic free energy .....	28
3.1.4 Calculation of phase diagrams in the external magnetic field .....	29
<b>3.2 Results and Discussion.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Effect of external magnetic field on the Gibbs free energy of the $\alpha$ phase .....	31
3.2.2 Effect of external magnetic field on the $\alpha/\gamma$ phase equilibria .....	32
3.2.2.1 Change of the transformation temperature in pure iron.....	33
3.2.2.2 Change of the $\alpha/\gamma$ phase equilibrium in Fe-C system .....	35
3.2.2.3 Change of the $\alpha/\gamma$ phase equilibrium in Fe-Mo system .....	36
3.2.2.4 Change of the $\alpha/\gamma$ phase equilibrium in Fe-Si system .....	37
3.2.2.5 Change of the $\alpha/\gamma$ phase equilibrium in Fe-Cr system.....	38
3.2.2.6 Change of the $\alpha/\gamma$ phase equilibrium in Fe-Mo-Si system.....	39
<b>3.3 Summary.....</b>	<b>40</b>
<b>4 Effects of external magnetic field on the diffusion coefficient of <math>\alpha</math>-Fe in pure iron and Fe-based alloys .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Solid diffusion.....</b>	<b>41</b>
4.1.1 The species and conditions of solid diffusion.....	41
4.1.2 The basic formula of diffusion.....	41
4.1.3 The mechanism of diffusion .....	42

4.1.4 The factor of diffusion .....	45
<b>4.2 Calculated model of the diffusion coefficient of magnetic atom in the <math>\alpha</math>-Fe with external magnetic field .....</b>	<b>46</b>
4.2.2 Diffusion model without external magnetic field .....	46
4.2.2.1 Magnetic contribution to diffusion activity energy.....	46
4.2.2.2 Calculated model of the diffusion coefficient.....	47
4.2.3 Calculated model of the diffusion coefficient with external magnetic field .....	48
<b>4.3 Results and Discussion.....</b>	<b>49</b>
4.3.1 Effect of external magnetic field on the self-diffusion in $\alpha$ -Fe.....	49
4.3.2 Effect of external magnetic field on the Co and Ni diffusion in $\alpha$ -Fe ..	49
<b>4.4 Summary.....</b>	<b>51</b>
<b>5 Effect of external magnetic field on <math>\alpha/\gamma</math> phase transition kinetics of pure iron and Fe-1C (at. %) alloy .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 The kinetics model in external magnetic field .....</b>	<b>52</b>
5.1.1 The kinetics model without external magnetic field.....	52
5.1.2 The calculated model of nucleation ratio and growth rapidity in external magnetic field.....	55
<b>5.2 Results and Discussion.....</b>	<b>56</b>
5.2.1 Effect of external magnetic field on critical nucleation radius and critical nucleation energy of pure iron and Fe-1C (at. %) alloy .....	56
5.2.2 Effect of external magnetic field on nucleation ratio of $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transition in pure iron and Fe-1C (at. %) alloy .....	59
5.2.3 Effect of external magnetic field on grain growth rapidity of $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transition in pure iron.....	60
5.2.4 Effect of external magnetic field on TTT kinetics curves of $\gamma \rightarrow \alpha$ phase transition in pure iron and Fe-1C (at. %) alloy .....	61
<b>5.3 Summary.....</b>	<b>62</b>
<b>Conclusions .....</b>	<b>64</b>

<b>References</b> .....	65
<b>Appendix</b> .....	71
<b>Publication</b> .....	74
<b>Acknowledgement</b> .....	75

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第一章 绪 论

### 1.1 概述

自从公元前 200 多年指南针在中国的出现, 磁场的作用逐渐被人们所认识, 随着人们不断对磁性本质地揭露, 磁场的应用已经渗透到各个领域, 包括生物、医学、化学、信息、交通运输、材料与冶金等。

20 世纪 60 年代发现了实用超导材料, 80 年代出现了性质优良的钕铁硼永磁材料, 使人们可以不耗费很大的电功率获得大体积持续的强磁场, 尤其是强磁场发生装置的商品化使磁场的应用更加广泛, 以此极端条件作为研究手段进行科学研究的范围不断扩大, 而且日趋普遍。所以, 近年来有关强磁场应用的学术论文越来越多, 而且呈不断上升的趋势。

磁场作为一种新型的冷物理场, 具有一个明显的优点, 即磁场作用的非接触性, 从而减少了对材料本身的污染, 使其在材料科学方面的应用越来越多, 不仅应用于金属材料, 在高分子方面也有应用。其中将强磁场应用于材料的制备及固态相变过程已成为材料电磁处理研究领域中新研究热点。

### 1.2 外磁场在材料制备过程中的应用

#### 1.2.1 外磁场在材料热处理过程中的应用

在外磁场的作用下用于改善各种金属材料力学性能的热处理方法称为磁场热处理, 这种方法于 1959 年由美国 RDCA (美国的开发与研究公司) 的总冶金师 Bassett 最先提出的, 故称为贝氏法<sup>[1]</sup>。

从 20 世纪 60 年代起我国研究人员就开始了开展磁场条件下相变的研究, 其研究发现: (a) 磁场淬火能使马氏体嵌镶块碎化、马氏体针显著细化并形成明显的组织; 采用交变纵向磁化、提高含碳量或提高磁场强度都能提高磁场淬火的效果<sup>[2]</sup>; (b) 淬火过程中加入磁场可促进奥氏体向马氏体转变, 并细化马氏体组织<sup>[3][4]</sup>; (c) 在连续冷却过程中加磁场可以使铁素体转变的 CCT 曲线左移, 淬透性

下降。在奥氏体化过程中加磁场,会降低奥氏体的稳定性,造成冷却过程中CCT曲线的左移<sup>[5]</sup>; (d) 脉冲磁场等温淬火可以降低过冷奥氏体的稳定性,促进过冷奥氏体向贝氏体转变,缩短等温时间;并可改善组织,即增加贝氏体数量,并对贝氏体形态和残余奥氏体量有一定的影响<sup>[6]</sup>; (e) 磁场淬火降低淬火形成的组织应力,残余奥氏体的数量减少有助于提高工件尺寸稳定性及淬火硬度<sup>[6][7]</sup>; (f) 在高磁场强度下,磁场不仅改变了物质的电子状态,也改变了晶体结构,同时磁场可直接影响所生成马氏体组织的分布状况<sup>[8][9]</sup>。

研究者们也在努力揭示磁场对变形铁基合金回复与再结晶行为的作用<sup>[10-16]</sup>,特别是对再结晶织构,晶界特征分布的影响,期望通过磁场退火能得到理想的织构以改善材料的机械性能。Martikainen和Lindroos<sup>[12]</sup>首先研究了强磁场对冷轧Armco铁再结晶行为的影响,结果表明磁场可以明显地推迟再结晶过程,在相同的热处理条件下,磁场热处理试样仍处于回复阶段,而无磁场热处理试样却已经进入再结晶阶段,只有为数有限的区域还处于回复之中,而且认为由磁场诱发的磁有序状态有可能影响晶界迁移和晶粒长大,因为在铁磁材料中,扩散强烈地依赖于磁有序化程度。此外,磁畴壁也可能对晶界迁移产生阻碍作用,因此再结晶过程就会受到抑制。

最近日本《金属》杂志介绍了一种金属热处理新工艺“磁场形变热处理法”,简称MTMP (Magneto-Thermo-Mechanical Process) 法。该法是利用强磁场下热处理来获得超细晶粒组织金属材料的方法,首先将金属材料加热到单相固溶温度区,然后在未再结晶温度区进行压力加工,在磁场下两相区相变过程中形成取向组织,随后沿取向组织进行纵向压轧完成再结晶,最后可以获得超细晶粒组织。在形变热处理过程中所施加的压力加工负荷要求不大,重要的是要求沿着厚度方向必须施加2 T (T为磁场强度单位) 以上的强磁场<sup>[17]</sup>。

### 1.2.2 外磁场下烧结对材料性能的影响

在材料的烧结过程中引入外部磁场会加速烧结过程 (活化烧结),从而起到控制和改变烧结体组织结构的作用。

张达明等人<sup>[18]</sup>研究了含Co量为 (6.0~9.5 wt. %) 的WC-Co系合金磁场烧结行为,磁场处理后的WC-Co系合金的空隙度比无磁场时更低,只有 (0.01 -0.02)

%, 粘结相分布更均匀, WC晶粒平均尺寸减小, 硬度、密度提高。易丹青等人<sup>[19]</sup>对Fe-22Cu (wt. %), WC-40Cu (wt. %) 合金在交变磁场下进行液相烧结进行了研究, 与无磁场情况下相比, 体系的相对密度明显提高, 固相颗粒更为分散, 轮廓更为清晰, 他们认为当在烧结过程中加入交变磁场时, 根据电磁感应原理, 其内部会感生出许多环行电流, 这种感生电流与外加磁场之间的电磁相互作用必然会对烧结动力学产生影响。

超导材料的一个重要性能指标就是临界电流密度值 ( $J_c$ ), 要提高 $J_c$ 值, 就有必要使材料纹理化, 控制材料的微观结构使晶粒充分接触。而在超导材料的烧结过程中施加磁场, 能促进晶粒的排列, 能够导致磁性纹理的生长过程。Holloway A等人<sup>[20]</sup>研究了 $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 的工业特性及 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $\text{RE}=\text{Y}$ 、 $\text{Ho}$ ) 超导性的磁场效果。Holloway<sup>[21]</sup>等对磁各向异性的HoBCO材料的晶粒长大过程进行了研究, 研究表明晶粒的方向由所加外部磁场的大小和方向控制, 晶粒排列的程度随外加磁场的增大而增大。

### 1.2.3 外磁场对金属凝固组织的影响

在金属凝固过程中施加磁场是改善组织结构、提高机械性能的有效方法之一。自从Vives<sup>[22]</sup>用交流磁场细化了铝合金凝固组织以后, 不断有学者将电磁场应用与凝固过程。80年代以后, 掀起了磁流体力学在材料凝固领域内研究的热潮。到目前为止, 凝固过程中施加的磁场主要有交变磁场、旋转磁场和直流磁场两种, 另外也有其它的特殊磁场, 如移动磁场、脉冲磁场, 变幅磁场等。

#### (1) 直流磁场对金属凝固组织的作用

直流磁场分为两种: 由传统线圈产生的普通强度的直流磁场和由超导线圈产生的高强度直流磁场。直流磁场通常施加于金属的定向凝固过程中。目前认同的直流磁场对金属凝固过程的影响机理主要集中于两个方面<sup>[23]</sup>: 一是自然对流引起的电磁制动效应; 二是热电流引起的热电磁对流效应。

王艳<sup>[24]</sup>等发现在单独直流磁场的作用下, 过共晶Al-18Si (wt. %) 合金在定向凝固时形成富Si特殊表面。当磁感应强度为0.15 T左右时, 中心组织发生粗化现象。磁感应强度为0.24 T时, 发生Si的偏析现象。改变稳恒直流磁场的方向, Si的偏析方式不改变。Uhlmann等<sup>[23]</sup>考察了0.2 T直流磁场对Al-Cu合金凝固组织的



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库